

Cuantificación de los componentes del suelo en secciones delgadas: Mosaicos de alta resolución *versus* imágenes individuales

Quantification of soil components in thin sections: High resolution mosaics versus individual images

Carlos Alberto **Torres-Guerrero**¹, María del Carmen **Gutiérrez-Castorena**^{1,*},
Edgar Vladimir **Gutiérrez-Castorena**², Carlos Alberto **Ortiz Solorio**¹, Juan Manuel **Herrera**³

¹ Programa de Edafología, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Km 36.5 Carretera México-Texcoco. 56230 Texcoco, Estado de México, México.

² Agua, Suelo y Ciencias Ambientales, Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León, Francisco Villa s/n, Ex-Hacienda "El Canadá", Gral. Escobedo, N.L. 66050, México.

³ Agroscope, Route de Duillier 50, 1260 Nyon, Suiza.

* Autor para correspondencia: (M.C. Gutiérrez-Castorena) castor@colpos.mx

Cómo citar este artículo:

Torres-Guerrero, C. A., Gutiérrez-Castorena, M. del C., Gutiérrez-Castorena, E. V., Ortiz Solorio, C.A., Manuel Herrera, J., 2020, Cuantificación de los componentes del suelo en secciones delgadas: Mosaicos de alta resolución *versus* imágenes individuales: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana 72(1), A300919 <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2020v72n1a300919>

Manuscrito recibido: Agosto 22, 2018
Manuscrito corregido: Diciembre 6, 2018
Manuscrito aceptado: Diciembre 20, 2018

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)

RESUMEN

Los cambios en la estructura del suelo se pueden monitorear a partir de muestras inalteradas a través del análisis micromorfométrico de secciones delgadas. En esta metodología es común que se empleen imágenes individuales (de tres hasta diez repeticiones) que no se pueden relacionar en diferentes escalas; además, aunque se establece un área mínima de estudio, se desconoce su representatividad en los componentes del suelo. El objetivo de este estudio fue cuantificar y los componentes del suelo (poros, agregados y raíces) y comparar los valores obtenidos a partir de imágenes individuales *versus* mosaicos de alta resolución de toda una sección delgada. Muestras inalteradas fueron colectadas en tres suelos con diferentes contenidos de arcilla (Entisols, Inceptisols y Vertisols) y presencia de raíces de maíz en la misma etapa de desarrollo fenológico (madurez fisiológica). De tres secciones delgadas de cada suelo ($4.6 \times 7.2 \text{ cm} \times 30 \mu\text{m}$; 1865 mm^2) se obtuvieron imágenes secuenciales de $11.1 \times 7.4 \text{ mm}$ (63 en total) a un aumento de $2\times$ utilizando un microscopio petrográfico y luz polarizada plana (PPL, por sus siglas en inglés). Los mosaicos de alta resolución espacial ($2.6 \mu\text{m pixel}^{-1}$) a una profundidad de color de 24 bits (8 bits \times 3 bandas en estándar RGB) se construyeron y analizaron utilizando operadores espaciales; posteriormente, se seleccionaron de manera aleatoria tres, cinco y diez imágenes. Tanto las imágenes individuales como los mosaicos fueron transformados mediante componentes principales en ArcGis® y los constituyentes del suelo fueron delimitados de acuerdo con los valores de sus varianzas. Los resultados indican que las imágenes individuales se recomiendan sólo para cuantificar porosidad o bien en sistemas homogéneos en estructura y color, pero no en sistemas heterogéneos donde los datos obtenidos muestran una alta variabilidad. Incluso cuando los resultados son similares a los calculados en los mosaicos, la dispersión de los datos es alta (varianza 5 veces mayor que la media) y con poca representación. En contraste, con los mosaicos de alta resolución se pueden cuantificar todos los componentes del suelo de toda la sección delgada y se pueden agrupar en clases o categorías para observar las relaciones externas o internas en el sistema del suelo. Además, los componentes del suelo se pueden relacionar con diferentes escalas, por ejemplo, macroagregados y raíces.

Palabras clave: Análisis de imágenes, segmentación, edaforrasgos, análisis de componentes principales, micromorfometría.

ABSTRACT

Changes in soil structure can be monitored in undisturbed soil samples through the micromorphometric analysis of thin sections. In this methodology, it is common that individual images (three to ten repetitions) are used and that they cannot be related in different scales between soil components; in addition, although a minimum study area is established, its representativeness in the soil components is unknown. The objective of this study was to quantify the soil constituent (pores, aggregates, and roots) and to compare the values obtained from individual images *versus* high-resolution mosaics from a complete thin section. Unaltered samples were collected in three soils with different clay contents (Entisols, Inceptisols, and Vertisols) and presence of maize roots in the same phenological development stage (physiological maturity). Three thin sections of each soil ($5 \times 7 \text{ cm} \times 30 \mu\text{m}$ 1865 mm^2) were prepared and sequential images of $11.1 \times 7.4 \text{ mm}$ (63 in total) were obtained at $2\times$ magnification using a petrographic microscope and plane polarized light (PPL). The high-resolution mosaics ($2.6 \mu\text{m pixel}^{-1}$) at a colour depth 24 bits (8 bits \times 3 bands in standard RGB) were built using space operators; subsequently, three, five and ten images were randomly selected. The individual images and the mosaics were transformed by principal component analysis in ArcGis® and soil constituents were delimited according to their variances values. The results indicate that individual images are recommended only to quantify porosity or in homogeneous systems in structure and color, but not in heterogeneous systems where the data obtained show high variability. Even when the results are similar to those calculated in the mosaics, the dispersion of the data is high (variance 5 times greater than the mean) and with little representation. In contrast, high-resolution mosaics offer the total quantification of the thin section and soil components can be grouped into classes or categories to observe intra or inter relations in the soil system. In addition, the soil components can be related to different scales, for example macroaggregates and roots.

Keywords: Image analysis, segmentation, pedofeatures, principal component analysis, micromorphometry.

1. Introducción

La estructura del suelo es uno de los indicadores de calidad más importantes para evaluar la productividad, sustentabilidad y degradación de los ecosistemas naturales o de producción agrícola (agroecosistemas). Para cuantificar los cambios estructurales en el suelo se han incluido un conjunto de datos básicos en donde sobresalen la estabilidad de agregados y la porosidad (Pagliai y Vignozzi, 2002; Allen *et al.*, 2011; Watteau *et al.*, 2019). La estabilidad de agregados se determina por una serie de propiedades químicas, físicas y biológicas, además de su manejo agronómico o prácticas de conservación (Six *et al.*, 2004; Totsche *et al.*, 2017). La porosidad, por su parte, es reconocida como el mejor indicador de la calidad de la estructura del suelo siendo necesaria su cuantificación en términos de forma, tamaño, continuidad, orientación y disposición para definir la complejidad de la estructura y comprender sus modificaciones (Pagliai y Vignozzi, 2002). Además, permite entender la retención y el movimiento del agua en el suelo (Shipitalo y Protz, 1987; Reynolds *et al.*, 2009).

La cuantificación de agregados y poros se ha realizado a través de metodologías convencionales, pero los resultados que se obtienen no son equivalentes entre técnicas y en general tienden a dar mayor importancia a alguno de los mecanismos individuales de desagregación (Gabioud *et al.*, 2011). Una alternativa viable es el análisis micromorfológico de secciones delgadas (Stoops, 2018) en donde se puede incorporar análisis de texturas, formas, distribución y continuidad, los cuales aportan información detallada de la forma y distribución de poros y agregados del suelo (Gutiérrez y Mejía, 2015; Poch, 2015). La desventaja de este tipo de análisis son los valores de cualquier componente del suelo que se obtienen generalmente a través de imágenes aisladas (Leonard *et al.*, 2019; Poch *et al.*, 2019), las cuales no siempre son representativas a causa de la gran heterogeneidad del suelo (Chesworth, 2008) ya que su área pequeña limita la correlación de

los componentes del suelo con diferentes escalas (Zaiets y Poch, 2016). Una solución planteada para reducir el sesgo de representatividad de las microfotografías fue propuesta en la década de los 90's y consistió en el pretratamiento digital (balanceo de color y mejoramiento del contraste) de las imágenes para analizar y cuantificar diferentes componentes del suelo (Protz *et al.* 1992; Terribile y FitzPatrick, 1992; Protz y VandenBygaart, 1998). Sin embargo, en estas investigaciones nunca hubo consenso en el número de imágenes a analizar debido a las dificultades técnicas y la capacidad de procesamiento de los ordenadores que se usaban en aquel momento.

Otras técnicas son el uso de imágenes de toda la sección delgada obtenidas a través de escáneres, y microtomografías computarizadas. Las primeras dan una idea global de la porosidad, pero son de baja resolución (Bullock y Murphy, 1980; Murphy, 1983; Protz y VandenBygaart, 1998; Jangorzo *et al.*, 2013; Bryk, 2016); mientras que las segundas son una técnica no invasiva y se usan para evaluar la estructura (Lebedeva *et al.*, 2019), porosidad del suelo (Turk y Graham, 2014; Kumi *et al.*, 2015; Stoops, 2015) y su distribución espacial en dos y tres dimensiones (Pires *et al.*, 2011; Carducci *et al.*, 2017; Lebedeva *et al.*, 2019). Sin embargo, las microtomografías computarizadas son deficientes para interrelacionar a los componentes dentro de la matriz órgano-mineral del suelo (Taina *et al.*, 2008).

Los mosaicos de alta resolución (0.0026 mm pixel^{-1}) pueden ser una alternativa pues resuelven varios de estos inconvenientes al: i) cubrir la totalidad de la sección delgada (Gutiérrez-Castorena *et al.*, 2018; Sauzet *et al.*, 2017), ii) cumplir con el concepto de área mínima representable (REA por sus siglas en inglés) propuesto por VandenBygaart y Protz (1999) y poder relacionar cualquier componente del suelo con altos porcentajes de precisión (Gutiérrez-Castorena *et al.*, 2018). Más aún, con el procesamiento digital de imágenes (Protz *et al.*, 1992; Protz y VandenBygaart, 1998) es posible obtener la varianza de los componentes del suelo en dos formas: i) en imágenes individuales

(Pineda-Marín *et al.*, 2012) y ii) comparando los valores obtenidos con la totalidad de la sección delgada a partir de mosaicos de alta resolución (Gutiérrez-Castorena *et al.*, 2018). De esa manera se pueden estandarizar los protocolos antes de comparar los valores de porosidad (Marcelino *et al.*, 2007).

El objetivo de esta investigación fue cuantificar los componentes del suelo (poros, agregados y raíces) y comparar los valores obtenidos a partir de mosaicos de alta resolución *versus* imágenes individuales tomadas de manera aleatoria (tres, cinco y diez) de toda la sección delgada del suelo, para determinar su representatividad en condiciones homogéneas / heterogéneas del suelo.

2. Materiales y métodos

2.1. SELECCIÓN DE MUESTRAS

Tres suelos de uso agrícola con diferentes cantidades de arcilla fueron seleccionados para coleccionar muestras inalteradas con ayuda de cajas tipo Kubiena. Dos suelos provienen del estado de Hidalgo: Vertisols (*Udic Haplausterts*) e Inceptisols (*Typic Dystrustepts*), según el levantamiento etnoedafológico realizado por Torres-Guerrero *et al.* (2019). Un suelo más provino del campo experimental del Colegio de Postgraduados campus Montecillo, Estado de México: Entisol (*Typic Ustifluvents*) (González, 2008). Las muestras inalteradas se tomaron a 55 días después de la siembra cerca de plantas de maíz, a 10 cm de la zona de influencia radical y a 10 cm de profundidad para asegurar raíces dentro de las cajas. En todos los suelos se coleccionaron tres muestras cerca de la misma planta para que éstas pudieran fungir como repeticiones de las cuantificaciones.

2.2. ELABORACIÓN DE SECCIONES DELGADAS

Las muestras coleccionadas fueron secadas al aire y a la sombra para su posterior impregnación con resina poliéster y monoestireno en una relación

3:1. La elaboración de las secciones delgadas de suelo ($5 \times 7 \text{ cm} \times 30 \mu\text{m}$) se llevó a cabo de acuerdo con Murphy (1986) y los componentes del suelo (porosidad, agregados, raíces) se describieron utilizando la terminología propuesta por Bullock *et al.* (1985) y Stoops (2003).

2.3. ADQUISICIÓN DE IMÁGENES

En cada sección delgada se tomaron 63 imágenes de manera secuencial utilizando una cámara digital Canon Rebel T3i (12.2 Megapíxeles), acoplada a un microscopio petrográfico Olympus BX51. El objetivo utilizado fue 2× con sólo una fuente de luz (luz polarizada plana, PPL). Cada imagen ($11.1 \times 7.4 \text{ mm}$) fue capturada en el formato original de la cámara *.CR2 y transformada a formato *.TIFF. La resolución de cada imagen fue de 4290×2856 píxeles; $0.0026 \text{ mm píxel}^{-1}$ y una profundidad de color de 24 bits (8 bits \times 3 bandas en estándar: roja, verde y azul; RGB por sus siglas en inglés).

2.4. ELABORACIÓN DE LOS MOSAICOS

Los mosaicos de alta resolución se construyeron utilizando operadores espaciales de acuerdo con la técnica propuesta por Gutiérrez-Castorena *et al.* (2016; 2018). Cada mosaico se integró inicialmente de 56 a 63 imágenes; no obstante, los mosaicos fueron recortados a un área total de 1865 mm^2 (6×5 imágenes aproximadamente; 367, 567, 200 píxeles μm^2) para evitar subestimaciones por el efecto de borde y adelgazamiento del pulido de las secciones delgadas.

2.5. ANÁLISIS DIGITAL DE IMÁGENES

2.5.1. IMÁGENES AISLADAS

De las imágenes secuenciales tomadas para los mosaicos se eligieron de forma aleatoria tres, cinco y diez por tratamiento dentro de cada sección delgada. Además, no se usaron imágenes subsecuentes para evitar las zonas de traslapes que fueron empleadas para la construcción del mosaico. Las imágenes fueron sometidas a un

proceso de transformación de tres bandas (RGB), con una profundidad de color de 24 bits, a imágenes en escala de grises (binarias de 8 bits) con ayuda del software Fiji de ImageJ (Schindelin *et al.*, 2012) para su posterior análisis. A cada una de las imágenes binarizadas se le practicó una segmentación a través del comando *ISO cluster unsupervised* dentro del software ArcGis 10.3®, dando como resultado una capa *raster* de categorías divididas con base en sus valores de saturación de grises. Con la ayuda de la imagen original, las categorías fueron reclasificadas en tres capas *raster*: espacio poroso, agregados y raíces. Posteriormente, las imágenes fueron vectorizadas para cuantificar sus áreas (polígonos) (Figura 1).

2.5.2. MOSAICOS DE ALTA RESOLUCIÓN

La delimitación y cuantificación de los componentes del suelo se llevó a cabo utilizando ArcGis® 10.3 (Environmental Systems Research Institute, 2015). Para reducir la información y optimizar el procesamiento de los mosaicos en un ordenador convencional, se realizó un pretratamiento a las imágenes que consistió en la transformación de componentes principales integrados por tres capas a una sola capa o componente (el cual representa más del 97% de la información de la imagen original) y de esta manera se redujo el tamaño de la

imagen de *Gigabytes* a *Megabytes*. Además, se eliminaron los cálculos redundantes debido a la composición de múltiples imágenes de los mosaicos (Terribile y FitzPatrick, 1992; Campbell, 1996). Al finalizar el pretratamiento de las imágenes, con la capa resultante de cada mosaico de obtuvieron las varianzas representativas de cada componente del suelo en escala de grises.

Posteriormente, se realizó una clasificación no supervisada (*ISO cluster unsupervised*) con 30 categorías y posteriormente, una reclasificación por atributos con la ayuda de la imagen original (color verdadero) más la del componente principal (generando falsos colores para cada componente del suelo) y la imagen resultante de la clasificación no supervisada. Con este proceso se delimitaron los agregados, raíces y espacio poroso en capas *raster*, que posteriormente fueron vectorizadas para su cuantificación final.

En el caso de los agregados, los vectores resultantes de cada mosaico se utilizaron para cuantificar y dividir los agregados en cinco clases: I) microagregados ($< 250 \mu\text{m}$ o 8180 píxeles), II) macroagregados muy finos (250–500 μm o 8180–29254 píxeles), III) finos (500–1000 μm o 29254–117164 píxeles), IV) medios (1000–5000 μm o 117164–3272000 píxeles) y V) gruesos ($>5000 \mu\text{m}$ o 3272000 píxeles) utilizando la propuesta de Gutiérrez-Castorena *et al.* (2018).

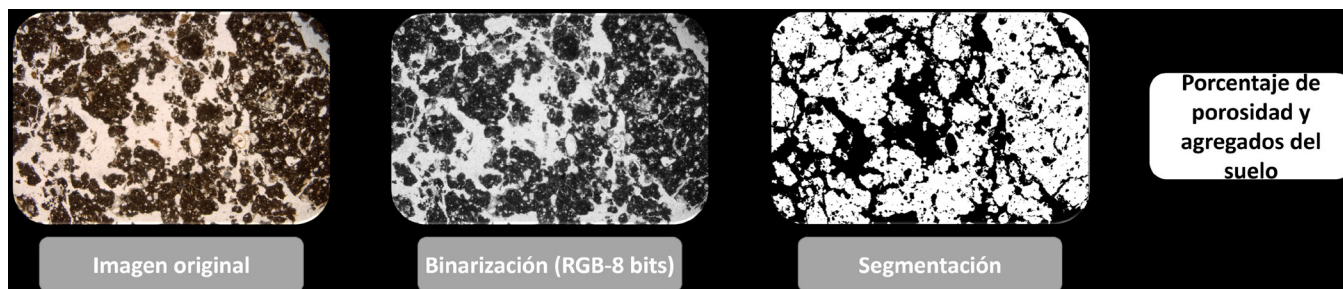


Figura 1 Proceso para la cuantificación del porcentaje de espacio poroso y agregados del suelo en imágenes aisladas de las secciones delgadas a una magnificación de 2×.

3. Resultados

Los contenidos de arcilla y algunas propiedades fueron obtenidas de los levantamientos edafológicos realizados por González (2008) y Torres-Guerrero *et al.* (2019) y son mostrados en la Tabla 1.

3.1. POROSIDAD

La porosidad calculada en la totalidad de los mosaicos varió de 42% a 55% en los tres suelos y en todos los casos la variación entre repeticiones no superó el 5%, con valores de 40–43% en Entisols, 51–55% en Inceptisols y 50%–55% para Vertisols (Tabla 2). Cuando se contrastaron los resultados obtenidos mediante imágenes individuales, la variación entre repeticiones fue mayor en todos los casos (9%, 11% y 16% para Inceptisols, Entisols y Vertisols, respectivamente).

En cuanto a los valores promediados de las repeticiones empleando la técnica convencional se puede observar que al usar tres imágenes se obtienen los valores más cercanos a la media calculada en los mosaicos de los tres suelos. En el 70% de los casos en donde se empleó la cuantificación con imágenes individuales, la varianza resultó ser mayor (hasta 300%) que la media calculada.

Al aumentar de 3 a 10 imágenes se puede reducir la varianza: Inceptisols (de 125 a 69) y Vertisols (de 70 a 53) pero no en Entisols, en donde se tienen valores con un comportamiento irregular (véase Tabla 2).

3.2. AGREGADOS Y RAÍCES

El tipo de agregados predominante en cada suelo fue el siguiente: en Entisols se presentan agregados

del tipo migajoso y granular en proporciones similares; en Inceptisols los bloques subangulares dominan por encima de los migajosos y granulares; por último, en Vertisols se observó un mayor número de agregados migajosos seguido por bloques subangulares (Figura 2).

La cuantificación de los agregados en cada una de las repeticiones donde se usaron fotografías individuales presentó una gran dispersión de los datos con valores por encima de la media al igual que los obtenidos en la porosidad. La mayor variación se registró cuando se emplearon tres imágenes en Entisols (11%) e Inceptisols (9%), y cinco y diez imágenes en Vertisols (25%) como se puede observar en la Figura 3a, 3b y 3c. En cuanto a los valores promedio calculados en todos los tratamientos, la mayor varianza (σ^2) se alcanzó en Entisols (128.94), seguido de Inceptisols (81.38) y Vertisols (92.21). Por otro lado, la variación de los valores obtenidos en los mosaicos para Entisols e Inceptisols no superó el 10%; mientras que para Vertisols fue de 18% (Figura 3d). Además, la cuantificación de agregados por medio de vectores en los mosaicos de alta resolución permitió clasificar a los agregados en diferentes categorías según su diámetro en una categoría de microagregados (< 250 μm) y cuatro de macroagregados (250 y hasta > 5000 μm). En este sentido es posible observar que sólo en Vertisols existe una distribución uniforme de todas las clases de agregados; mientras que en Entisols e Inceptisols ocurre una mayor proporción de macroagregados clases IV y V (Tabla 3). La separación en clases de diferentes tamaños de agregados permitió no sólo observar distribución y dominancia de cada categoría, sino

Tabla 1. Propiedades edáficas en donde se obtuvieron las muestras para elaborar las secciones delgadas de suelo.

Suelo	Cantidad de arcilla	Clase Textural	Densidad Aparente (g cm^{-3})	M.O. (%)
<i>Typic Ustifluents</i> (Entisols)	37	Franco-arcilla-limosa	1.3	2.08
<i>Typic Dystrustepts</i> (Inceptisols)	43	Arcillosa	1.43	1.16
<i>Udic Haplusterts</i> (Vertisols)	57	Arcillosa	1.52	4.25

también la relación con la porosidad del suelo. En la Figura 4 se muestra como ejemplo, uno de los mosaicos de Vertisols en el cual es fácil reconocer las clases de agregados e inferir acerca del tipo y la magnitud de los poros que se generan. Los valores promedio de raíces obtenidos en la totalidad de las secciones delgadas para los tres suelos difirió entre imágenes individuales y mosaicos con 4.54%, 2.66% y 0.63% para los Vertisols, Entisols e Inceptisols, respectivamente (Tabla 4). En la Figura 5 se puede apreciar que cuando se usan únicamente tres imágenes existe una gran variabilidad en la

distribución de poros y agregados del suelo y una escasa presencia de raíces provocando diferencias abruptas entre la cuantificación de imágenes. Cuando se emplearon cinco imágenes, la variabilidad entre poros y agregados se redujo (hasta en 10%), pero si se agrega un componente tan heterogéneo en su distribución como son las raíces, las diferencias se incrementan > 20% (Figura 6).

Con diez imágenes la variación disminuye, aunque los datos de varianza son altos; por ejemplo, en agregados se pueden obtener valores desde 22.51% hasta 49.38% (Figura 7).

Tabla 2. Porosidad del suelo calculado con técnicas convencionales (imágenes aisladas) y mosaicos de alta resolución compuestos de imágenes secuenciales en los tres suelos muestreados.

Método	1		2		3		Promedio	
	Porcentaje	Varianza	Porcentaje	Varianza	Porcentaje	Varianza	Porcentaje	Varianza
	(%)	(σ^2)	(%)	(σ^2)	(%)	(σ^2)	(%)	(σ^2)
	Entisols (<i>Typic Ustifluvents</i>)							
Fotos aisladas								
Tres	49	66.91	38	60.37	49	93.9	45	73.3
Cinco	53	149.82	45	280.56	54	81.36	51	170.58
Diez	51	87.98	40	114.7	47	82.45	46	95.04
Mosaico	43		40		42		42	
	Inceptisols (<i>Typic Dystrustepts</i>)							
Fotos aisladas								
Tres	53	17.31 [†]	49	125.44	53	49.42 [†]	52	125.44
Cinco	51	26.01 [†]	49	117.29	53	47.06 [†]	51	117.29
Diez	52	50.69	41	65.77	44	92.16	46	69.54
Mosaico	55		51		52		53	
	Vertisols (<i>Udic Haplusterts</i>)							
Fotos aisladas								
Tres	55	8.35 [†]	59	70.73	47	25.91 [†]	54	70.73
Cinco	41	5.90 [†]	57	58.68	45	48.16 [†]	48	58.68
Diez	50	53.58	45	13.12 [†]	39	25.60 [†]	45	53.58
Mosaico	55		50		53		53	

[†]Tratamientos en los que la varianza resultó menor a la media.

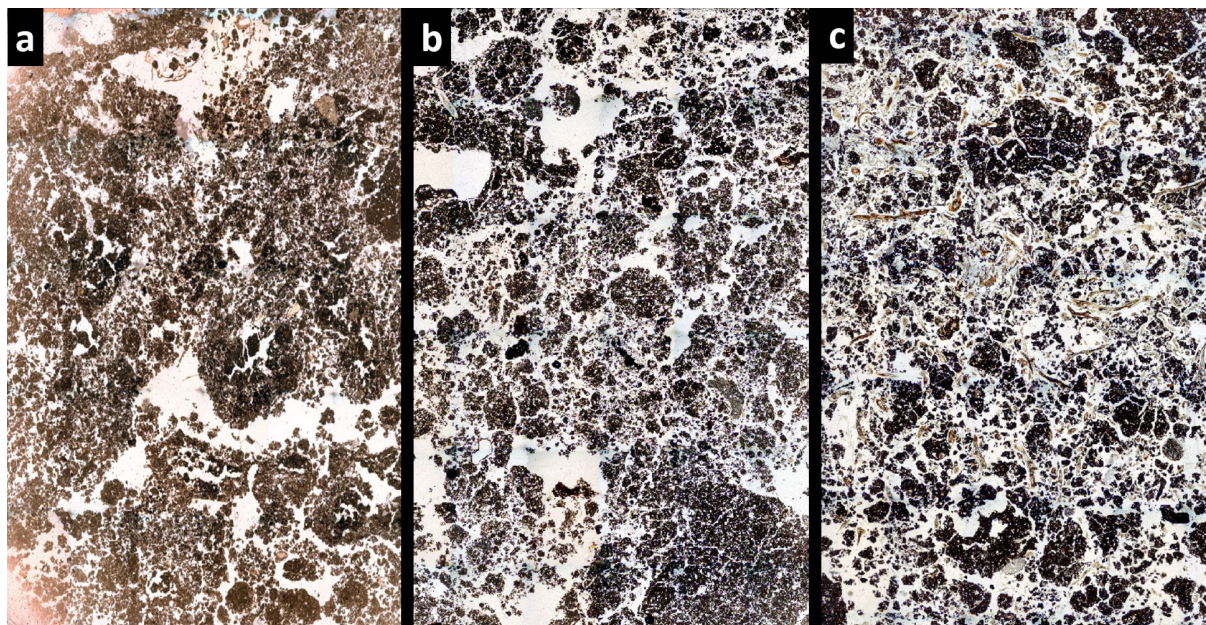


Figura 2 Proceso para la cuantificación del porcentaje de espacio poroso y agregados del suelo en imágenes aisladas de las secciones delgadas a una magnificación de 2x.

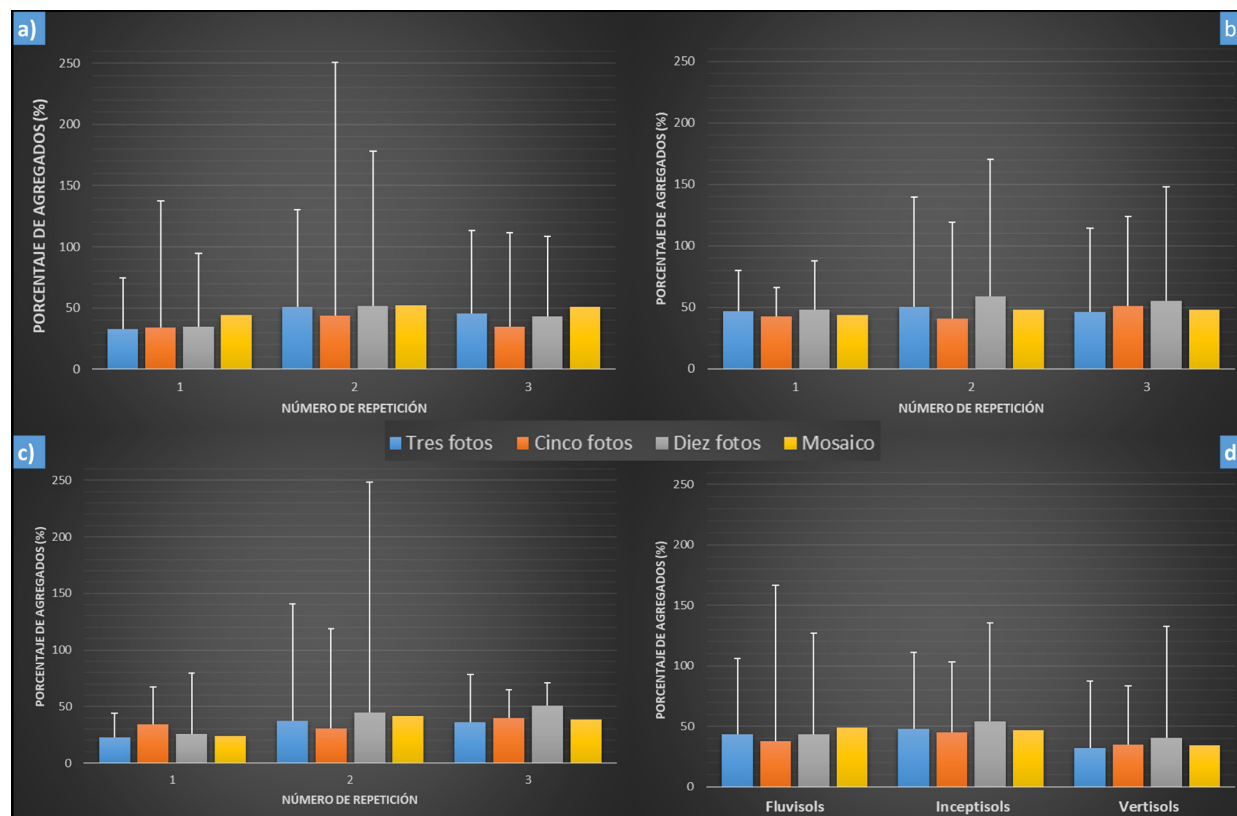


Figura 3 Porcentaje de agregados calculados en fotografías aisladas *versus* mosaicos de alta resolución de secciones delgadas en a) Entisols, b) Inceptisols, c) Vertisols y d) el valor promedio obtenido de las repeticiones.

3.3. TIEMPO DE ANÁLISIS

El tiempo que toma cada método de análisis para obtener el resultado final, es decir, la cuantificación de cada componente del suelo se reporta en la Tabla 5. Un mayor número de imágenes puede reducir la dispersión y por consecuencia la varianza de los datos de las cuantificaciones en agregados y poros. Por ejemplo, en un análisis de 20 o 30 imágenes individuales será necesario entre 120 y 150 minutos comparados con los 170 minutos que se requieren en un mosaico de 49 imágenes.

Tabla 3. Distribución de los agregados cuantificados en los mosaicos de alta resolución y clasificados en diferentes clases de tamaño. Clase I) microagregados (< 250 μm), clase II) macroagregados muy finos (250–500 μm), clase III) finos (500–1000 μm), clase IV) medios (1000–5000 μm) y clase V) gruesos (> 5000 μm).

Clase	Porcentaje de agregados (%)			
	Número de repetición			Promedio
	1	2	3	
	Entisols (<i>Typic Ustifluvents</i>)			
I	3.25	4.78	2.54	3.52
II	2.01	2.67	1.89	2.19
III	6	6.05	2.43	4.83
IV	13.04	13.23	18.47	14.91
V	20.2	25.45	25.84	23.83
Total	44.5	52.18	51.17	49.28
	Inceptisols (<i>Typic Dystrustepts</i>)			
I	4	4.4	2.81	3.74
II	2.04	1.59	1.05	1.56
III	4.55	2.6	2.26	3.14
IV	16.4	7.68	8.85	10.98
V	16.81	31.88	32.91	27.2
Total	43.8	48.15	47.88	46.61
	Vertisols (<i>Udic Haplusterts</i>)			
I	8.11	4.33	5.22	5.89
II	3.49	1.71	2	2.4
III	6.39	2.31	3.03	3.91
IV	5.85	3	7.7	5.52
V	0	30.02	20.49	16.84
Total	23.84	41.37	38.44	34.55

4. Discusión

4.1. IMÁGENES INDIVIDUALES

El análisis de imágenes aisladas resulta ser una de las técnicas más empleadas para la cuantificación de componentes del suelo en secciones delgadas, debido a su practicidad y bajo costo de implementación; no obstante, se debe considerar la homogeneidad/heterogeneidad del suelo (Bullock *et al.*, 1985). Para cuantificar la porosidad en suelos homogéneos (Inceptisols y Vertisols) con dominancia de un solo tipo de poros (fisuras), son suficientes tres fotografías para obtener variaciones entre muestras menores a 10%, lo que concuerda con los resultados obtenidos por Ringrose Voase (1996) y Poch *et al.* (2019). De hecho, Pineda-Marrín *et al.* (2012) encontraron que en sustratos con poros de empaquetamiento simple o compuesto se puede obtener una desviación estándar por debajo de 10%, con alta aproximación de los valores reales de la totalidad de una sección delgada. En contraste, cuando el suelo es heterogéneo con dominancia de más de un tipo de poros (como en Entisols; Figura 2) a causa de una mayor actividad biológica (Zaiets y Poch, 2016), la variabilidad se incrementa (> 10%) y los datos son estadísticamente no confiables.

Las imágenes individuales también son útiles cuando los agregados tienen un patrón de distribución homogéneo en términos de color y tipo de agregados como es el caso de los Entisols e Inceptisols estudiados. No obstante, en un sistema heterogéneo de agregados no sólo en el tipo (migajosos y bloques subangulares), sino también en el tamaño, se pueden obtener valores que los sobre o subestime hasta en más de 25%, como es el caso de los Vertisols. En estos suelos, la cuantificación de los agregados y su porosidad es muy importante para monitorear todo el manejo agro-nómico (Coulombe *et al.*, 1996; Chesworth, 2008; Torres-Guerrero, 2016).

En cuanto al REA para evaluar porosidad y agregados, las imágenes individuales cumplen con lo establecido por VandenBygaart y Protz (1999); sin embargo, sus varianzas son muy altas (> 200),

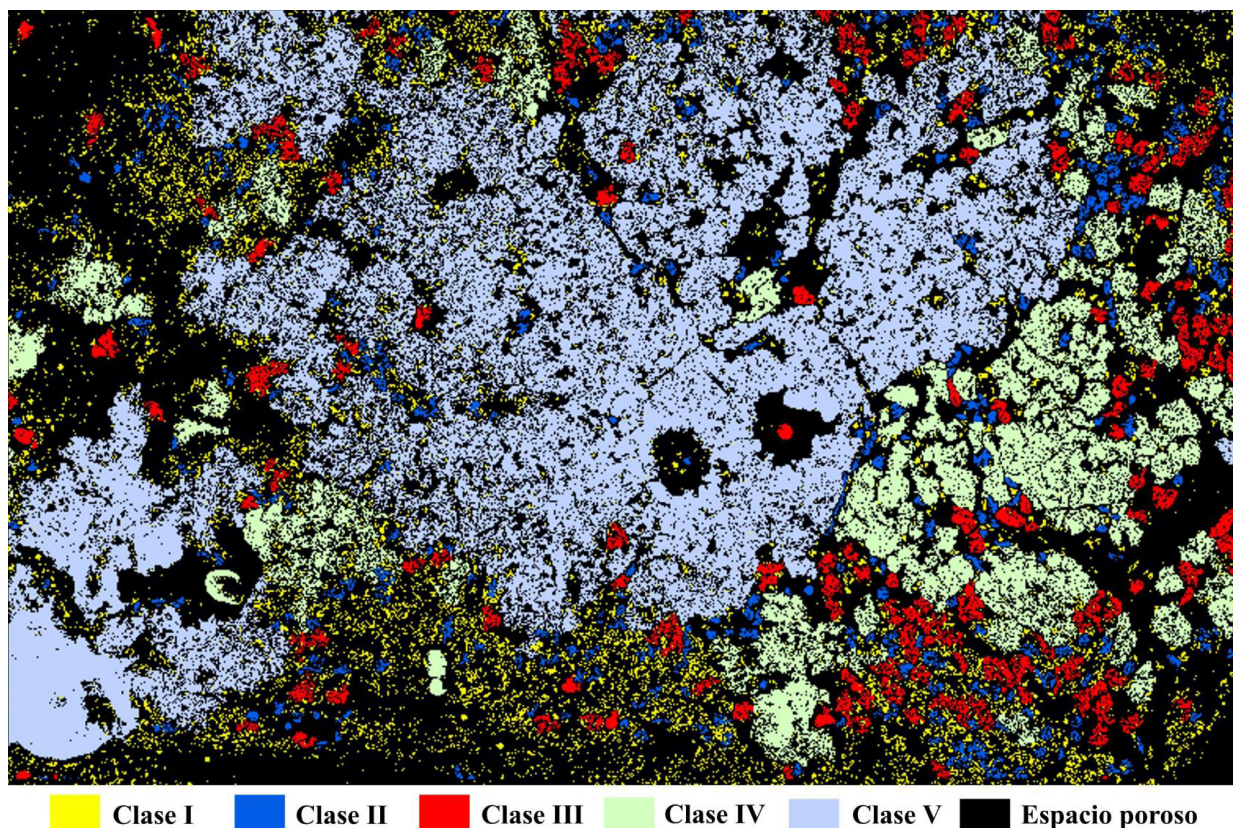


Figura 4 Distribución por clases de agregados en un mosaico de alta resolución correspondiente al tratamiento de Vertisols y rotación de cultivo en el mes octubre. La estructura del suelo puede ser visualizada y correlacionada con otros componentes del suelo en la totalidad de la sección delgada. Longitud del marco 54.17 mm. Clase I microagregados ($<250\ \mu\text{m}$), clase II) macroagregados muy finos ($250\text{--}500\ \mu\text{m}$), clase III) finos ($500\text{--}1000\ \mu\text{m}$), clase IV) medios ($1000\text{--}5000\ \mu\text{m}$) y V) gruesos ($>5000\ \mu\text{m}$).

ya que en algunos casos los agregados ($> 5000\ \text{mm}$) ocupaban $> 70\%$ de una imagen causando un problema de representatividad. Asimismo, al incorporar un componente más (en este caso las raíces) a la delimitación y cuantificación, los valores de imágenes aisladas distaron considerablemente de la cuantificación total, ya que el patrón de distribución de las raíces se encuentra relacionado con el tipo de agregados (migajosos) y poros (de empaquetamiento compuesto) del suelo, haciendo poco confiable esta técnica debido a que la varianza que se registró fue hasta 5 veces mayor a la media.

4.2. MOSAICOS DE ALTA RESOLUCIÓN

La heterogeneidad del suelo se analiza más eficientemente con mosaicos debido a que la variabilidad

se reduce significativamente ($< 5\%$) y se resuelven las sobrestimaciones de las imágenes aisladas (Aydemir *et al.*, 2004). Además, se pueden cuantificar y relacionar todos los componentes del suelo (Gutiérrez-Castorena *et al.*, 2018), algo que no se alcanza con la microtomografía computarizada (Stoops, 2018). Cuando se presentan agregados $> 8000\ \text{mm}$ comunes en los Vertisols (Bravo-Garza y Bryan, 2005), se recomienda usar la segmentación y algoritmos para clasificar a los agregados en diferentes tamaños.

Con el procesamiento digital de imágenes complejas, los resultados pueden ser uniformizados y reproducidos por cualquier usuario (Marcelino *et al.*, 2007), pero conservando la heterogeneidad del suelo para reconocer mayor detalle de ciertos componentes y área observada (FitzPatrick, 1984; Stoops, 2003). Por ejemplo, se puede seleccionar

uno o más constituyentes (raíces y agregados) y determinar su distribución y relación en el desarrollo estructural de un suelo (Fitzpatrick, 1990; Stoops, 2003).

En estudios anteriores, las relaciones entre raíces con la microestructura (Moran, 1993; Moran *et al.*, 2000), con la porosidad (Kodešová *et al.*, 2006) o con la formación de agregados del suelo (De León-González *et al.*, 2007) se llevaban a cabo en áreas muy pequeñas o con imágenes de baja resolución. Entonces, si la finalidad de los estudios es demostrar diferentes procesos, relaciones o distribuciones de edaforrasgos dentro de una sección delgada, el uso de mosaicos de alta resolución es una alternativa más eficiente (Gutiérrez-Castorena

et al., 2018). Además, se pueden trabajar múltiples escalas microscópicas en una computadora y aplicar el concepto de homogeneidad/heterogeneidad (Bullock *et al.*, 1985). De hecho, la tendencia hacia el futuro es incorporar dos o más análisis en donde se integren múltiples escalas para correlacionar los análisis físicos y químicos del laboratorio con la actividad biológica y los procesos de pedogénesis (Jangorzo *et al.*, 2013, Carducci *et al.*, 2017).

Con esta metodología también es posible implementar análisis cuantitativos que comprendan uno o varios componentes del suelo a diferencia de la microtomografía computarizada, la cual es deficiente al delimitar componentes del suelo dentro de la matriz órgano-mineral y los procesos biológicos

Tabla 4. Distribución de raíces en el suelo calculado con técnicas convencionales (imágenes aisladas) y mosaicos de alta resolución compuestos de imágenes secuenciales en los tres suelos muestreados.

Método	Número de repetición						Promedio	
	1		2		3			
	Porcentaje	Varianza	Porcentaje	Varianza	Porcentaje	Varianza	Porcentaje	Varianza
	(%)	(σ^2)	(%)	(σ^2)	(%)	(σ^2)	(%)	(σ^2)
Entisols (<i>Typic Ustifluvents</i>)								
Fotos aisladas								
Tres	17.91	51.64	10.86	71.57	5.43	9.73	11.4	44.31
Cinco	12.75	4.60 [†]	11.25	51.98	11.14	30.08	11.71	29.13
Diez	14.12	21.87	8.48	47.61	9.78	13.84	10.79	27.77
Mosaico	12.5		7.82		6.83	12.5	9.05	
Inceptisols (<i>Typic Dystrustepts</i>)								
Fotos aisladas								
Tres	0.09	0.07 [†]	0.27	0.14 [†]	0.71	0.15 [†]	0.36	0.12 [†]
Cinco	0.09	0.05 [†]	0.26	0.10 [†]	0.84	0.38 [†]	0.4	0.18 [†]
Diez	0.08	0.05 [†]	0.26	0.11 [†]	0.75	0.26 [†]	0.36	0.14 [†]
Mosaico	1.11		0.95		0.29		0.78	
Vertisols (<i>Udic Haplusterts</i>)								
Fotos aisladas								
Tres	26.63	4.00 [†]	13.37	29.16	10.94	32.38	16.98	21.85
Cinco	24.63	5.86 [†]	12.46	30.47	10.03	28.03	15.71	21.45
Diez	24.02	4.54 [†]	10.05	35.65	10.01	25.3	14.69	23.9
Mosaico	21.12		8.1		8.1		12.44	

[†]Tratamientos en los que la varianza resultó menor a la media.

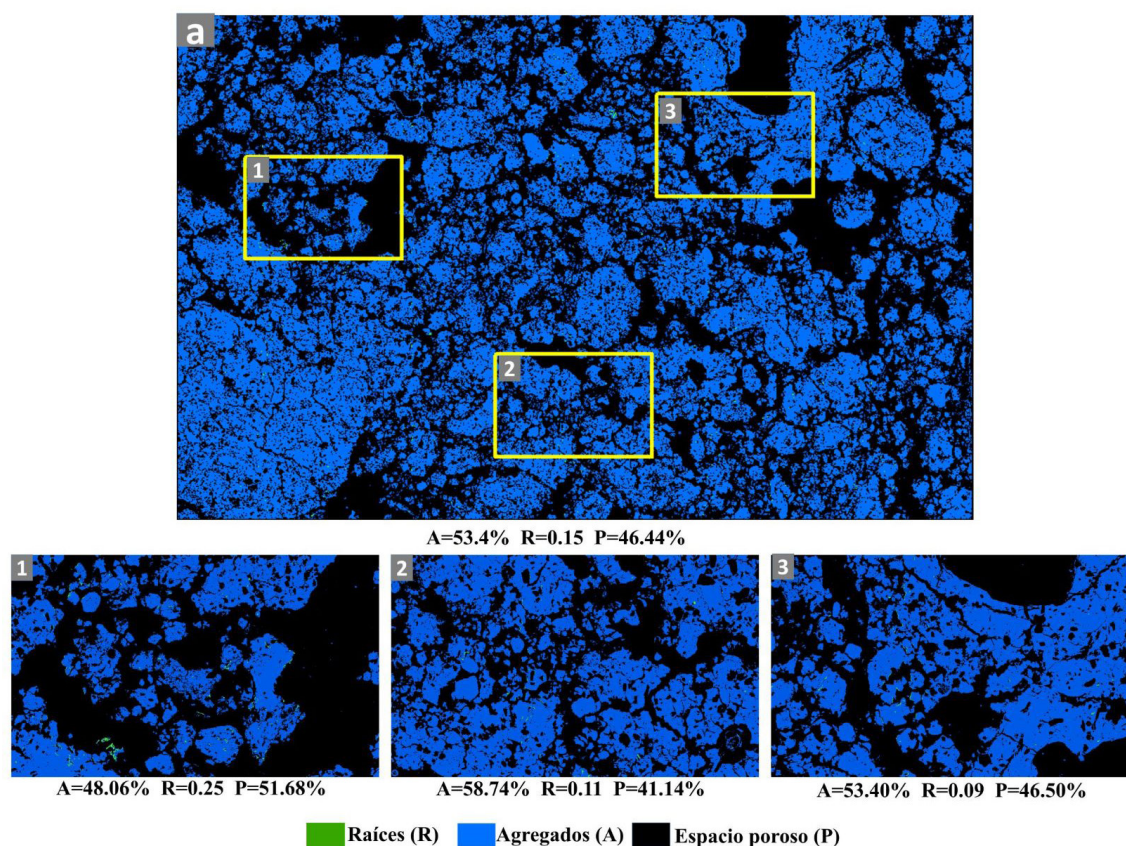


Figura 5 Cuantificación de los componentes del suelo en el mosaico de alta resolución (a) y en tres imágenes aisladas en Inceptisols en el mes de agosto. Longitud del mosaico (a) 54.17 mm y de las fotografías aisladas (1 a 3) 8.32 mm.

que ocurren en el suelo (Taina *et al.*, 2008). Los mosaicos proporcionan un medio de descripción e interpretación adicional a los estudios convencionales, al correlacionar espacialmente dichos rasgos en áreas completas de secciones delgadas (Adderley *et al.*, 2002). Además, se pueden interrelacionar elementos que no siempre coinciden en escala como es el caso de las bacterias con los agregados del suelo y los componentes minerales (Nunan *et al.*, 2003; Gutiérrez-Castorena *et al.*, 2016) o los revestimientos arcillosos con la macro y microporosidad (Sauzet *et al.*, 2017).

Finalmente, en cuanto a la pedogénesis, en esta investigación se demostró que la prevalencia de raíces en Vertisols y Entisols desarrolla una estructura heterogénea conformada por agregados granulares y poros de empaquetamiento compuesto generados por la actividad biológica (Six *et al.*, 2004). Sin la presencia de raíces como

en Inceptisols, el suelo es más homogéneo y únicamente ocurren fisuras y bloques subangulares en donde sólo dominan los procesos físicos de humedecimiento y secado característicos de suelos arcillosos (Coulombe *et al.*, 1996).

5. Conclusiones

La cuantificación de la porosidad del suelo a través de imágenes aisladas resulta ser un método confiable con una sobrestimación < 10%, si el objetivo de la investigación es descriptivo y no pretende relacionar con otros componentes del suelo. Sin embargo, en agregados (tamaño y tipo) no se recomiendan pues el número de imágenes necesarias para obtener cuantificaciones estadísticamente representativas es variable y muy alto.

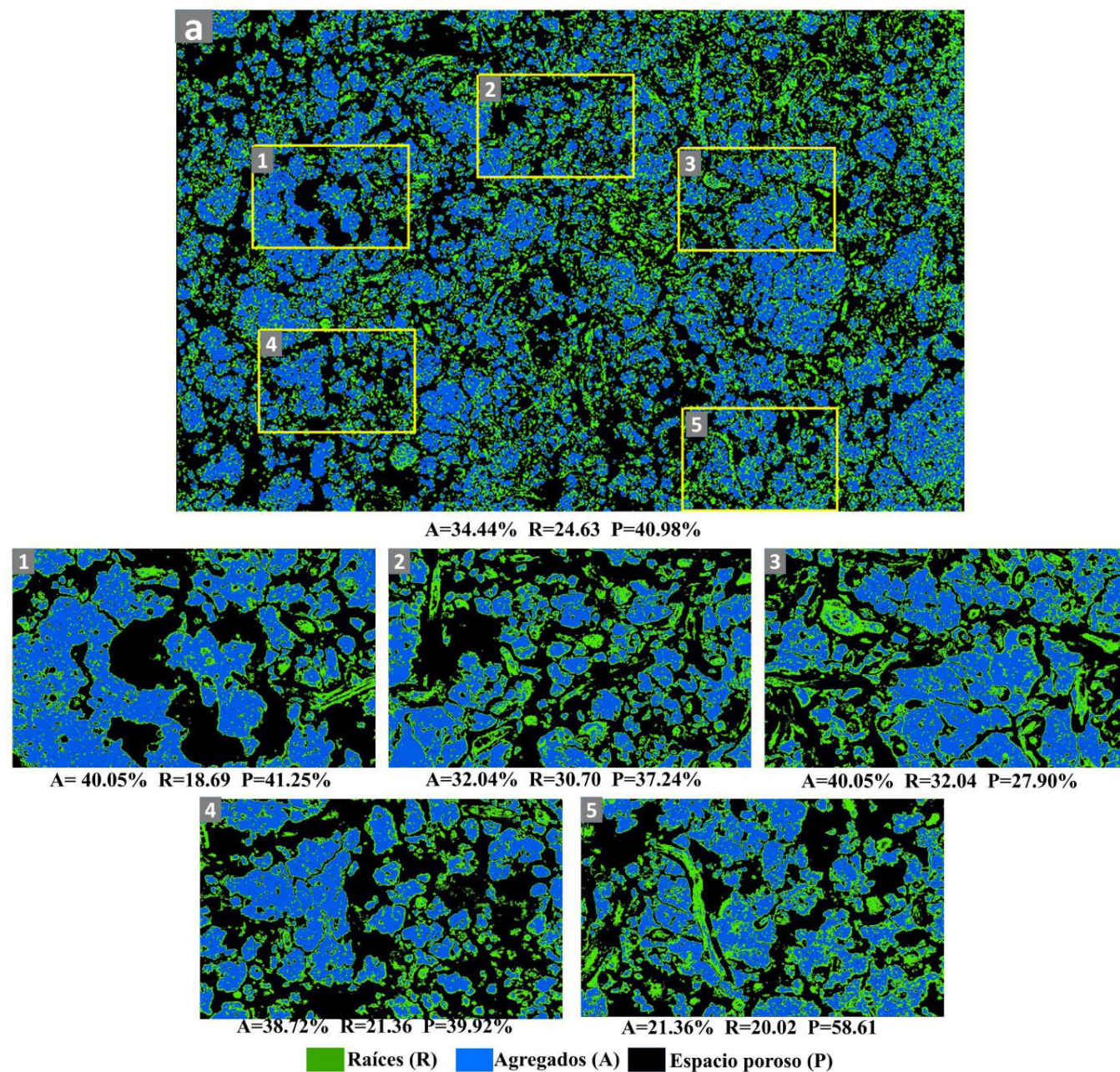


Figura 6 Distribución de agregados, poros y raíces en un mosaico de alta resolución (a) y cinco imágenes aisladas en el tratamiento con mayor cantidad de raíces en Vertisols. Longitud del mosaico (a) 54.17 mm y de las fotografías aisladas (1 a 5) 8.32 mm.

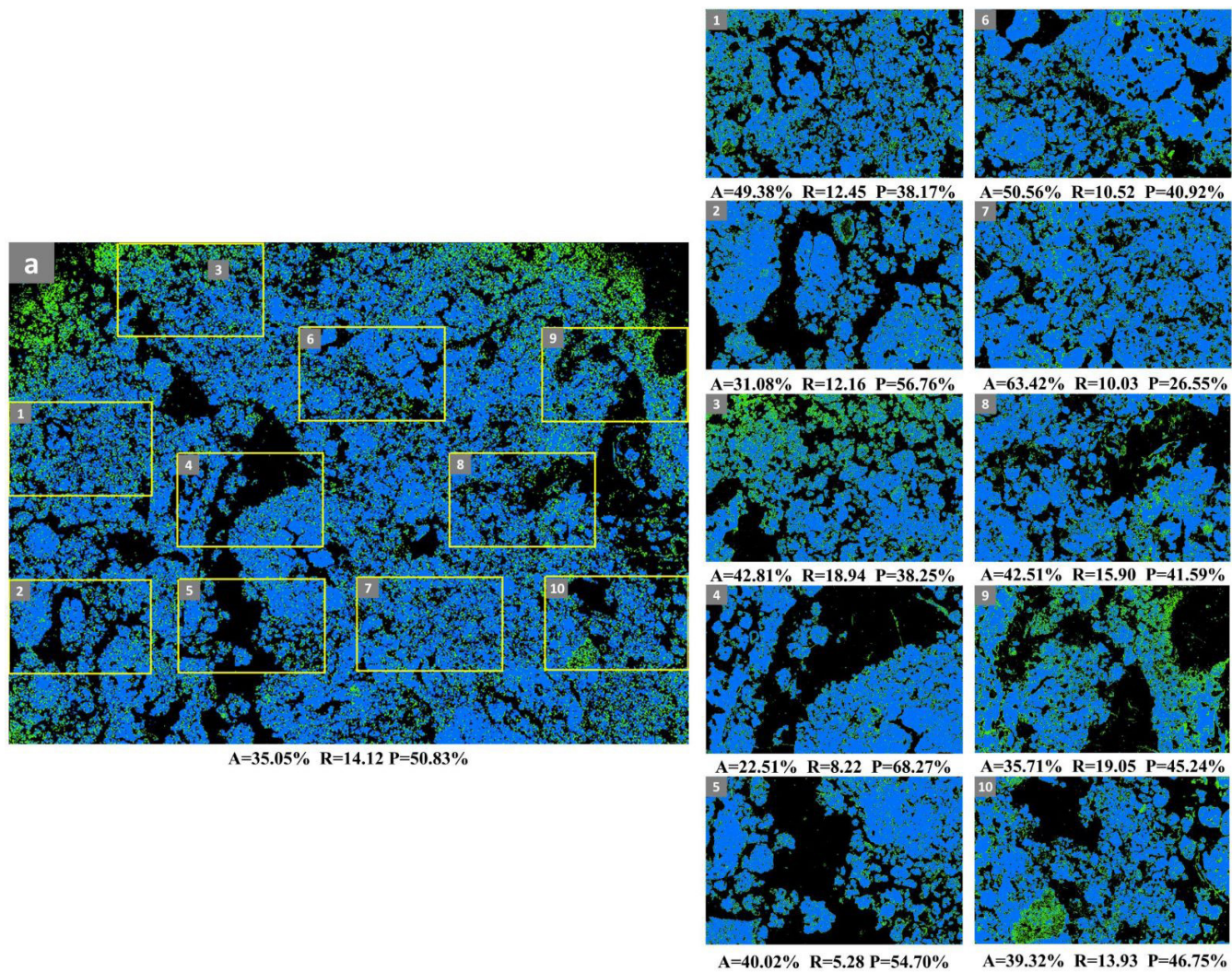


Figura 7 Distribución de agregados, poros y raíces en un mosaico de alta resolución (a) y cinco imágenes aisladas en el tratamiento con mayor cantidad de raíces en Vertisols. Longitud del mosaico (a) 54.17 mm y de las fotografías aisladas (1 a 5) 8.32 mm.

Tabla 5. Tiempo para realizar la delimitación y cuantificación de componentes del suelo en una sección delgada.

	Tiempo (minutos)			
	Fotografías aisladas			Mosaico
	3	5	10	
Toma de fotografías	8	10	15	35
Unión de fotografías (mosaico)	ns	ns	ns	30
Pretratamiento de imágenes	5	10	15	15
Análisis (segmentación, clasificación y cuantificación)	15	20	30	90
Tiempo Total	28	40	60	170*

* El tiempo total comprende los vectores de cada componente del suelo a los cuales se les puede practicar cualquier análisis de medición espacial incluido en el software ArcGis® (ns) no se requiere.

Con los mosaicos de alta resolución es posible cuantificar y observar el patrón de distribución de los poros, agregados y raíces y sus inter-relaciones presentes en las secciones delgadas. Además, los diferentes componentes del suelo pueden ser categorizados según su diámetro, área o longitud, permitiendo generar estimaciones y generalizaciones con mayor certeza estadística al realizar repeticiones de secciones delgadas subsecuentes de un mismo bloque. En ese sentido, esta metodología ofrece cuantificaciones totales que pueden abarcar áreas en donde se desee monitorear los diferentes procesos y transformaciones del suelo.

Referencias

- Adderley, W.P., Simpson, I.A., Davidson, D.A., 2002, Colour description and quantification in mosaic images of soil thin sections: *Geoderma*, 108(3–4), 181–195. [https://doi.org/10.1016/s0016-7061\(02\)00123-4](https://doi.org/10.1016/s0016-7061(02)00123-4)
- Allen, D.E., Singh, B.P., Dalal, R.C., 2011, Soil health Indicators under climate change: A review of current knowledge, in Singh, B.P., Cowie, A.L., Yin Chan, A. (eds.), *Soil Health and Climate Change*: New York, Springer, 29, 25–49. https://doi.org/10.1007/978-3-642-20256-8_2
- Aydemir, S., Keskin, S., Drees, L.R., 2004, Quantification of soil features using digital image processing (DIP) techniques: *Geoderma*, 119(1–2), 1–8. [https://doi.org/10.1016/s0016-7061\(03\)00218-0](https://doi.org/10.1016/s0016-7061(03)00218-0)
- Bravo-Garza, M.R., Bryan, R.B., 2005, Soil properties along cultivation and fallow time sequences on Vertisols in Northeastern Mexico: *Soil Science Society of America Journal*, 69(2), 473–481. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0473>
- Bryk, M., 2016, Macrostructure of diagnostic B horizons relative to underlying BC and C horizons in Podzols, Luvisol, Cambisol, and Arenosol evaluated by image analysis: *Geoderma*, 263, 86–103. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.09.014>
- Bullock, P., Murphy, C.P., 1980, Towards the quantification of soil structure: *Journal of Microscopy*, 120(3), 317–328. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2818.1980.tb04151.x>
- Bullock, P., Fedoroff, N., Jongerius, A., Stoops, G., Tursina, T., Babel, U., 1985, *Handbook for Soil Thin Section Description*: Wolverhampton, UK, Waine Research Publications, 605 p.
- Campbell, J., 1996, *Introduction to remote sensing*: New York, The Guilford Press, 287 p.
- Carducci, C.E., Zinn, Y.L., Rossoni, D.F., Heck, R.J., Oliveira, G.C., 2017, Visual analysis and X-ray computed tomography for assessing the spatial variability of soil structure in a cultivated Oxisol: *Soil and Tillage Research*, 173, 15–23. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.03.006>
- Chesworth, W., 2008, *Encyclopedia of the Earth Sciences*: Dordrecht, The Netherlands, Springer, 189 p.
- Coulombe, C.E., Wilding, L.P., Dixon, J.B., 1996, Overview of Vertisols: characteristics and impacts on society: *Advances in Agronomy*, 57, 289–375. [https://doi.org/10.1016/s0065-2113\(08\)60927-x](https://doi.org/10.1016/s0065-2113(08)60927-x)
- De León-González, F., Gutiérrez-Castorena, M.C., González-Chávez, M.C.A., Castillo-Juárez, H., 2007, Root-aggregation in a pumiceous sandy soil: *Geoderma*, 142(3–4), 308–317. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.08.023>
- Environmental Systems Research Institute, 2015, ArcGis 10.3. Computer Software: Environmental Systems Research Institute Inc, Redlands, CA.
- Fitzpatrick, E.A., 1984, *Micromorphology of soils*: New York, Chapman and Hall, 427 p.
- Fitzpatrick, E.A., 1990, Roots in the thin sections of soils: *Development in Soil Science*, 19, 9–23. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)70311-8](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)70311-8)
- Gabioud, A.E., Wilson, M.G., Sasal, M.C., 2011, Análisis de la estabilidad de agregados por el método de Le Bissonnais en tres órdenes de suelos: *Ciencia del Suelo*, 29(2), 129–139.

- González, A.L., 2008, Elaboración de un mapa de suelos y evaluación de su calidad en el Colegio de Postgraduados campus Montecillo, Estado de México: México-España, Universidad de Lleida y Universidad Autónoma Chapingo, proyecto final de carrera. 125 p.
- Gutiérrez, C.V.R., Mejía, C.J.M., 2015, Caracterización de propiedades físicas de suelos mediante análisis de imágenes y simulación fluido-dinámica a escala de poro, en Loaiza, J.C., Stoops, G., Poch, R.M., Casamitjana, M. (eds.), Manual de micromorfología de suelos y técnicas complementarias: Colombia, Fondo Editorial Pascual Bravo, 353–383.
- Gutiérrez-Castorena, E.V., Gutiérrez-Castorena, M.C., Vargas, T.G., Bontemps, L.C., Martínez, J.D., Méndez, E.S., Solorio-Ortiz, C.A., 2016, Micromapping of microbial hotspots and biofilms from different crops using digital image mosaics of soil thin sections: *Geoderma*, 279, 11–21. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.05.017>
- Gutiérrez-Castorena, M.C., Gutiérrez-Castorena, E.V., Gonzalez-Vargas, T., Solorio-Ortiz, C.A., Suástegui-Méndez, E.S., Cajuste-Bontemps, L., Rodríguez-Mendoza, M.N., 2018, Thematic micro-maps of soil components using high-resolution mosaics from whole soil thin sections and image analysis: *European Journal of Soil Science*, 69(2), 217–231. <https://doi.org/10.1111/ejss.12506>
- Jangorzo, N.S., Schwartz, C., Watteau, F., 2013, Image analysis of soil thin sections for a non-destructive quantification of aggregation in the early stages of pedogenesis: *European Journal of Soil Science*, 65(4), 485–498. <https://doi.org/10.1111/ejss.12110>
- Kodešová, R., Kodeš, V., Žigová, A., Šimůnek, J., 2006, Impact of plant roots and soil organisms on soil micromorphology and hydraulic properties: *Biologia*, 61(19), 339–343. <https://doi.org/10.2478/s11756-006-0185-7>
- Kumi, F., Hanping, M., Jianping, H.M., Ullah, I., 2015, Review of applying X-ray computed tomography for imaging soil-root physical and biological processes: *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 8 (5), 1–13. <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20150805.1490>
- Lebedeva, M.P., Golovanov, D.L., Shishkov, V.A., Abrosimov, K.N., 2019, Microscopic and Tomographic Studies for Interpreting the Genesis of Desert Varnish and the Vesicular Horizon of Desert Soils in Mongolia and the USA: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 71(1), 21–42. <https://doi.org/10.18268/bsgm2019v71n1a3>
- Leonard, D., Sedov, S., Solleiro-Rebolledo, E., Fedick, S.L., Diaz, J., 2019, Ancient Maya Use of Hidden Soilscapes in the Yalahau Wetlands, Northern Quintana Roo, Mexico: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 71(1), 93–119. <https://doi.org/10.18268/bsgm2019v71n1a6>
- Marcelino, V., Cnudde, V., Vansteelandt, S., Carò, F., 2007, An evaluation of 2D-image analysis techniques for measuring soil microporosity: *European Journal of Soil Science*, 58(1), 133–140. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00819.x>
- Moran, C.J., 1993, Image processing and soil micromorphology: *Developments in Soil Science*, 22, 459–482. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)70434-3](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)70434-3)
- Moran, C.J., Pierret, A., Stevenson, A.W., 2000, X-ray absorption and phase contrast imaging to study the interplay between plant roots and soil structure: *Plant and Soil*, 223, 99–115. <https://doi.org/10.1023/A:1004835813094>
- Murphy, C.P., 1983, Point counting pores and illuvial clay in thin section: *Geoderma*, 31(2), 133–150. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(83\)90004-6](https://doi.org/10.1016/0016-7061(83)90004-6)
- Murphy, C.P., 1986, Thin Section Preparation of Soils and Sediments: Berkhamsted, UK, AB Academic, 149 p.

- Nunan, N., Wu, K., Young, I.M., Crawford, J.W., Ritz, K., 2003, Spatial distribution of bacterial communities and their relationships with the micro-architecture of soil: *FEMS Microbiology Ecology*, 44(2), 203–215. [https://doi.org/10.1016/s0168-6496\(03\)00027-8](https://doi.org/10.1016/s0168-6496(03)00027-8)
- Pagliai, M., Vignozzi, N., 2002, Image Analysis and Microscopic Techniques to Characterize Soil Pore System, in Blahovec, J., Kutílek, M. (eds.), *Physical Methods in Agriculture*: Boston, MA, Springer, 2–13.
- Pineda-Marín, L., Gutiérrez-Castorena, M.C., Anicua-Sánchez, R., Cajuste-Bontemps, L., Gutiérrez-Castorena, E.V., 2012, Quantification of porosity in substrates using thin Sections and image analysis: *Acta Horticulturae*, 947, 105–110. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2012.947.11>
- Pires, L.F., Cassaro, F.A.M., Bacchi, O.O.S., Reichardt, K., 2011, Non-destructive image analysis of soil surface porosity and bulk density dynamics: *Radiation Physics and Chemistry*, 80(4), 561–566. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2010.12.006>
- Poch, R.M., 2015, Micromorfometría, en Loaiza, J.C., Stoops, G., Poch, R.M., Casamitjana, M. (eds.), *Manual de micromorfología de suelos y técnicas complementarias*: Colombia, Fondo Editorial Pascual Bravo, 309–320.
- Poch, R.M., Pascual, M., Villar, J., Rufat, J., 2019, Soil porosity changes in orchards with subsurface irrigation: quantification and interpretation: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 71(1), 1–10. <https://doi.org/10.18268/bsgm2019v71n1a1>
- Protz, R., VandenBygaart, A., 1998, Towards systematic image analysis in the study of soil micromorphology: *Sciences of Soils*, 3(1), 34–44. <https://doi.org/10.1007/s10112-998-0004-0>
- Protz, R., Sweeney, S.J., Fox, C.A., 1992, An application of spectral image analysis to soil micromorphology, 1. Methods of analysis: *Geoderma*, 53(3–4), 275–287. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(92\)90059-g](https://doi.org/10.1016/0016-7061(92)90059-g)
- Reynolds, W.D., Drury, C.F., Tan, C.S., Fox, C.A., Yang, X.M., 2009, Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality: *Geoderma*, 152(3–4), 252–263. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.06.009>
- Ringrose Voase, A.J., 1996, Measurement of soil macropore geometry by image analysis of sections through impregnated soil: *Plant and Soil*, 183(1), 27–47. <https://doi.org/10.1007/bf02185563>
- Sauzet, O., Cammas, C., Marc, J., Bajard, M., Montagne, D., 2017, Development of a novel image analysis procedure to quantify biological porosity and illuvial clay in large soil thin sections: *Geoderma*, 292, 135–148. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.004>
- Schindelin, J., Arganda-Carreras, I., Frise, E., Kaynig, V., Longair, M., Pietzsch, T., Preibisch, S., Rueden, C., Saalfeld, S., Schmid, B., Tinevez, J., White, D.J., Hartenstein, V., Eliceiri, K., Tomancak, P., Cardona, A., 2012, Fiji: An open source platform for biological-image analysis: *Nature Methods*, 9(7), 676–682. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2019>
- Shipitalo, M.J., Protz, R., 1987, Comparison of morphology and porosity of a soil under conventional and zero tillage: *Canadian Journal of Soil Science*, 67(3), 445–456. <https://doi.org/10.4141/cjss87-043>
- Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S., Denef, K., 2004, A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics: *Soil & Tillage Research*, 79(1), 7–31. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.008>
- Stoops, G., 2003, *Guidelines for Analysis and Description of Soil and Regolith Thin Sections*: Madison, Wisconsin, USA, Soil Science Society of America, 184 p. <https://doi.org/10.2136/2003.guidelinesforanalysis>

- Stoops, G., 2015, Composición de la masa basal y de los edaforrasgos, en Loaiza, J.C., Stoops, G., Poch, R.M., Casamitjana, M. (eds), Manual de micromorfología de suelos y técnicas complementarias: Colombia, Fondo Editorial Pascual Bravo, 309–320.
- Stoops, G., 2018, Micromorphology as a Tool in Soil and Regolith Studies, in Stoops, G., Marcelino, V., Mees, F. (eds.), Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths. Second edition: Netherlands, Elsevier, 1–21.
- Taina, I.A., Heck, R.J., Elliot, T.R., 2008, Application of X-ray computed tomography to soil science: A literature review: Canadian Journal of Soil Science, 88(1), 1–19. <https://doi.org/10.4141/cjss06027>
- Terribile, F., FitzPatrick, E.A., 1992, The application of multilayer digital image processing techniques to the description of soil thin sections: Geoderma, 55(1–2), 159–174. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(92\)90011-u](https://doi.org/10.1016/0016-7061(92)90011-u)
- Torres-Guerrero, C.A., Gutiérrez-Castorena, M.C., Ortiz-Solorio, C.A., Herrera, J.M., Gutiérrez-Castorena, E.V., Etchevers, B.J.D., 2016, Effect of root decomposition on the soil structure using micromapping. Poster. 15th International Conference on Soil Micromorphology. Instituto de Geología UNAM. Mexico City.
- Torres-Guerrero, C. A., M.C. Gutiérrez-Castorena, J.M. Herrera, C.A. Ortiz-Solorio y E.V. Gutiérrez-Castorena, 2019, Descomposición de las raíces de maíz a nivel de parcela y regional usando el conocimiento local de tierras y técnico de suelos: Agrociencia. 53(5), 661–680.
- Totsche, K.U., Amelung, W., Gerzabek, M.H., Guggenberger, G., Klumpp, E., Knief, C., Lehdorff, E., Mikutta, R., Peth, S., Prechtel, A., Ray, N., Kögel-Knabner, I., 2017, Microaggregates in soils: Journal of Plant Nutrition & Soil Science, 181(1), 1–33. <https://doi.org/10.1002/jpln.201600451>
- Turk, J.K., Graham, R.C., 2014, A proposed master V horizon for the designation of near-surface horizons with vesicular porosity: Soil Science Society of America Journal, 78, 868–880.
- VandenBygaart, A.J., Protz, R., 1999, The representative elementary area (REA) in studies of quantitative soil micromorphology: Geoderma, 89(3–4), 333–346. [https://doi.org/10.1016/s0016-7061\(98\)00089-5](https://doi.org/10.1016/s0016-7061(98)00089-5)
- Watteau, F., Jangorzo, N.S., Schwartz, C.H., 2019, A micromorphological analysis for quantifying structure descriptors in a young constructed Technosol: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 71(1), 11–20. <https://doi.org/10.18268/bsgm2019v71n1a2>
- Zaiets, O., Poch, R.M., 2016, Micromorphology of organic matter and humus in Mediterranean mountain soils: Geoderma, 272, 83–92. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.03.006>